

INSTABILIDADE EM TERRAÇOS AGRÍCOLAS NO VALE DO DOURO, PINHÃO. MODELAÇÃO MATEMÁTICA DE BASE FÍSICA

INSTABILITY IN AGRICULTURAL TERRACES IN DOURO VALLEY, PINHÃO. PHYSICALLY BASED MATHEMATICAL MODELING

Faria, Ana, *FLUP, Porto, Portugal, ana_faria_91@hotmail.com*
Bateira, Carlos, *FLUP, Porto, Portugal, carlosbateira@gmail.com*
Soares, Laura, *FLUP, Porto, Portugal, Impsoares@gmail.com*
Fernandes, Joana, *FLUP, Porto, Portugal, joanafcfernandes@gmail.com*
Oliveira, Ana, *FLUP, Porto, Portugal, anasfoliveira.90@outlook.pt*
Teixeira, Manuel, *Porto, Portugal, manparedes@gmail.com*
Gonçalves, José Alberto, *FCUP, Porto, Portugal, jagoncal@fc.up.pt*
Marques, Fernando, *FCUL, IDL, Portugal, fsmarques@fc.ul.pt*

RESUMO

Pretende-se avaliar a suscetibilidade a movimentos de vertente aplicando modelos de base física em terraços agrícolas com taludes em terra e com muros de pedra em seco na Região Demarcada do Douro.

Foram utilizados os modelos SHALSTAB e SINMAP, que utilizam um modelo de análise de estabilidade baseado no talude infinito e um modelo hidrológico. Ambos utilizam os seguintes parâmetros de base física: coesão, ângulo de atrito, peso específico e espessura do solo. Distinguem-se pela fórmula matemática que compõe cada modelo e essencialmente pela utilização diferenciada da modelação das áreas contributivas do modelo hidrológico.

Procedeu-se à validação dos resultados obtidos utilizando o inventário dos movimentos ocorridos e recorrendo à matriz de contingência. Os resultados obtidos mostram que, o modelo SHALSTAB foi mais eficiente ao prever que 77% dos deslizamentos do inventário foram bem classificados, enquanto o SINMAP apenas previu 51%.

ABSTRACT

To evaluate the landslide susceptibility of on agricultural terraces with risers and stone wall support structures in the Douro Region, physically based mathematical models were applied.

Were used the SHALSTAB and SINMAP models, which combine an infinite slope stability analysis model and a steady state hydrological model. Both use the following basic physical parameters: cohesion, friction angle, specific weight and soil thickness. Besides the different mathematical formula used in each model, the modelling of the hydrological model contributory areas is based on different algorithms.

The validation of the modelling results was made using the inventory of past landslides and applied the contingency matrix method. According to the results, the SHALSTAB classifies 77% of the landslides on the high susceptibility areas, while SINMAP only classifies 51%.

Palavras-chave: Instabilidade Vertentes, Patamares Agrícolas, Vale do Douro, Modelos Matemáticos

Keywords: Slope Instability, Agricultural terraces, Douro Valley, Mathematical models.

1. INTRODUÇÃO

Várias são as metodologias que calculam a suscetibilidade a movimentos de vertente, desde métodos qualitativos a quantitativos, podendo estes últimos classificar-se como base física ou estatística (Baum *et al.*, 2002, Borga *et al.*, 1998).

O objetivo deste trabalho prende-se com a avaliação e cartografia da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de vertente em terraços agrícolas no vale do Douro vinhateiro, S. João da Pesqueira (Portugal) aplicando dois modelos matemáticos de base física, o SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*) e o SINMAP (*Stability Index Mapping*), e avaliar a sua capacidade preditiva. Ambos têm sido utilizados na avaliação da suscetibilidade a movimentos de vertente mas em contextos geográficos muito diferenciados, sem organização das vertentes em terraços agrícolas.

A área experimental situa-se na quinta das Carvalhas que se insere, e caracteriza-se geologicamente pela formação de Bateiras, constituída por xistos negros intercalados com metagrauvaques, e filitos e níveis calcários a que se sobrepõem espessos metagrauvaques com intercalações de filitos (Sousa, 1989). Em estado natural, o tipo de solo da área de estudo remete para litossolos êutricos associados a luvisolos (WRB, 2006). O uso do solo predominante da quinta é essencialmente o cultivo da vinha, com 116ha, num total de 300ha.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O SHALSTAB modela a suscetibilidade a deslizamentos superficiais translacionais baseado na associação de um modelo hidrológico com um modelo de estabilidade (Dietrich *et al.*, 1995, Montgomery *et al.*, 1994). Através da combinação dos dois modelos, é obtida a fórmula que representa a quantidade de precipitação crítica (Q_c) necessária para a ocorrência de movimentos de vertente (Equação 1).

$$\frac{Q_c}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b} \left[\frac{c'}{p_w g z \cos^2\theta \tan\phi} + \frac{p_s}{p_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) \right] \quad [1]$$

Em que Q_c é a precipitação crítica; T é a transmissividade; θ é o declive; b é a dimensão da unidade de terreno; a são as áreas contributivas; c' é a coesão do solo; p_w é o peso específico da água; p_s é o peso específico do solo e por fim o ϕ que é o ângulo de atrito interno.

Os parâmetros físicos do SHALSTAB são introduzidos pelo investigador na modelação de acordo com as análises em laboratório e levantamentos de campo efetuados, nomeadamente a coesão (c'), o ângulo de atrito interno (ϕ), e o peso específico do solo (p_s) e a espessura do solo (z) respetivamente (Quadro 1).

Os dados de entrada para o SINMAP utilizam valores máximos e mínimos o que permite ao modelo obter resultados com maior variação espacial. Para além da coesão do solo, o modelo utiliza valores para a coesão das raízes. O modelo de estabilidade (IE) do SINMAP está expresso na equação 2:

$$IE = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta [p_s g (D - D_w) + (p_s g - p_w g) D_w] \tan\phi}{D p_s g \sin\theta \cos\theta} \quad [2]$$

Em que C_r é a coesão da rede radicular (N/m^2); C_s é a coesão do solo (N/m^2); θ é o declive; p_w é a densidade do solo saturado (kg/m^3); g é a aceleração gravitacional ($9,81 m/s$); D é a profundidade vertical do solo (m); D_w é a altura vertical da coluna de água no solo (m) e ϕ é o ângulo de atrito interno.

A razão T/R é um dos parâmetros hidrológicos incorporados no modelo SINMAP, ou seja, é a relação entre a precipitação diária e a transmissividade.

Para este cálculo foi necessário considerar a precipitação diária do episódio chuvoso em que ocorreram processos de instabilidade. Os dados pluviométricos foram registados numa estação meteorológica situada na quinta de S. Luiz, a cerca de 6km da área de estudo, em linha reta. Tendo em conta as precipitações registadas utilizaram-se os dados pluviométricos do dia 5 de Outubro de 2009 (16.6 mm/dia). A transmissividade é o produto da espessura do solo pela condutividade hidráulica. Foi utilizado o valor médio de 0.00009 cm/min medido nos levantamentos efetuados no terreno. A espessura do solo foi verificada no terreno, tendo sido utilizada a espessura média de 2 metros. Este valor corresponde à espessura dos materiais mobilizados aquando da construção dos patamares agrícolas. Considerando a uniformidade geomorfológica da bacia hidrográfica utilizada para a aplicação destes dois modelos, podemos concluir pelo bom ajuste dos valores destes parâmetros apesar da generalização feita na modelação.

A coesão, de 2900 N/m², e o ângulo de atrito, de 32°, foram determinados em ensaios de corte direto em laboratório. A modelação no SINMAP incorpora ainda a coesão das raízes (Schmidt *et al.*, 2001) de forma combinada com o cálculo da coesão. No entanto as raízes da vinha são muito pouco consistentes, com fraca densidade e profundidade tendo sido atribuído o valor de zero, à coesão produzida por estas (Quadro 1).

Quadro 1- Parâmetros Físicos utilizados na Modelação.

SHALSTAB	SINMAP
(c') 2900 N/m ² ;	T/R min e máx 218.6 e 291.5 m ³ /h;
(φ) 32°;	(c') min e máx 2900 e 3877 N/m ² ,
(z) 2m	(φ) min e máx 31.6 e 31.9 °;
(ps) 16.7 kN/m ³	(z) 2m,
	(ps) 16.7 kN/m ³

No sentido de proceder à validação dos modelos foi realizado o inventário (Westen *et al.*, 2006) dos pontos de instabilidade tendo sido registados os deslizamentos translacionais de pequena dimensão ao longo dos taludes, quedas de muros associados a deslizamentos, muros reconstruídos ou com deformações e fendas.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para ambas as modelações foi utilizado um modelo digital de elevação com um metro de resolução espacial, por processamento de fotografias aéreas com 50cm de resolução no terreno.

De acordo com os 2 modelos de base física, as áreas contributivas são determinadas com metodologias diferentes (Figura 1). O SHALSTAB utiliza a metodologia do MD8 - *Multiple Flow Direction* (Quinn *et al.*, 1991) e o SINMAP utiliza o D∞ - D-Infinito (Tarboton, 1997).

De acordo com o modelo MD8 (Quinn *et al.*, 1991) a classe com maior representatividade em termos de área é a classe dos 0-25m² com 30.61%, seguindo-se a classe dos 100-200m² (14.80%) e a classe 50-100m² (14.59%) (Figura 1).

Por outro lado o SINMAP incorpora o modelo D-Infinito. Este modelo, desenvolvido por Tarboton (1997), permite descrever infinitas direções do fluxo, contrariamente aos modelos anteriormente criados. De acordo com a metodologia do D∞, é também a classe 0-25m² que apresenta maior representatividade em termos de área (49.55% do

total da bacia), apresentando as classes seguintes uma área bastante inferior (Figura 1).

A metodologia das áreas contributivas reflete várias diferenças. No D ∞ , as classes mais baixas (três primeiras classes) estão distribuídas por largas extensões da bacia (71.96% da área da bacia) modelando o fluxo ao longo da vertente de forma difusa ao passo que no MD8 as áreas contributivas têm uma distribuição mais uniforme (57.74% da área da bacia nas três primeiras classes). Na ótica das áreas contributivas a modelação com o MD8 representa o fluxo através de caminhos preferenciais. Inversamente, o D ∞ modela o fluxo interno com base num sistema de drenagem difuso.

Considerando a similitude de parâmetros utilizados nos modelos de estabilidade de ambos os modelos de avaliação da suscetibilidade, as grandes diferenças podem ser relacionadas com as diferenças nos modelos hidrológicos e com o algoritmo utilizado na integração do modelo de estabilidade com o modelo hidrológico (Figura 1).

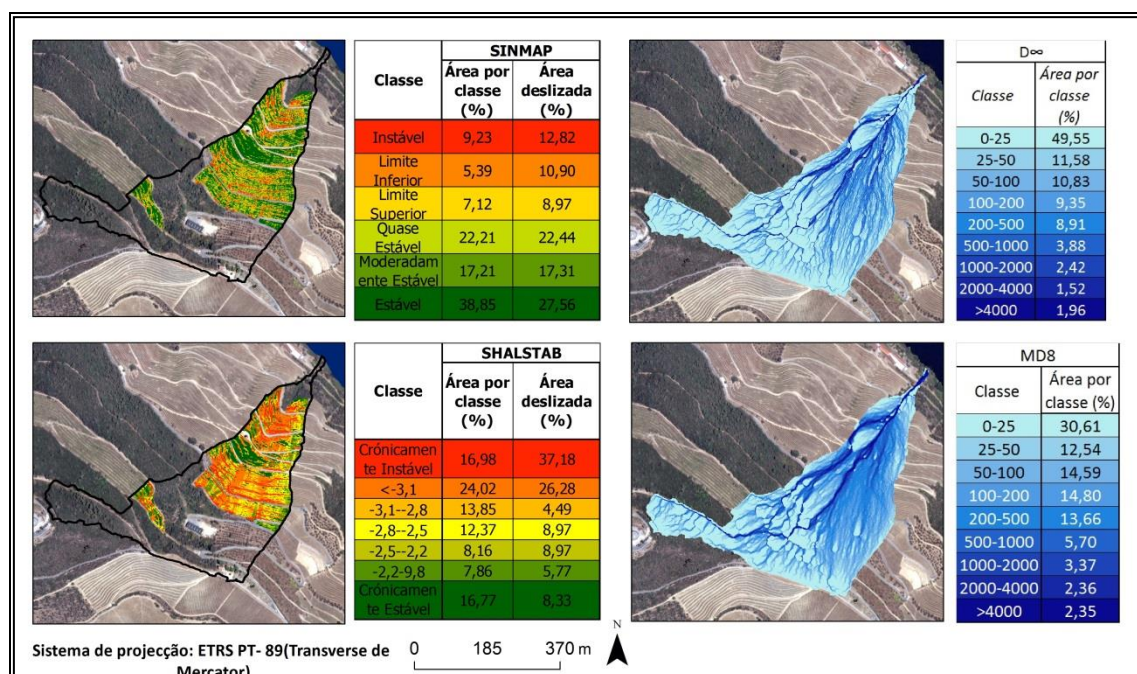


Figura 6- Suscetibilidade a Movimentos de Vertente em Taludes de Patamares Agrícolas. Quinta das Carvalhas, com os mapas das áreas contributivas correspondentes.

De acordo com a modelação obtida no SINMAP, a classe considerada "estável" conta com 38.85% do total da bacia, a classe "moderadamente estável" com 17.21% e a classe "quase estável" com 22.21%. São as classes que apresentam a maior área na bacia (78.27%). Relativamente à percentagem de deslizamentos ocorridos por classe, é de salientar que 27.56% dos deslizamentos ocorreram na classe considerada "estável" e 22.44% na classe contabilizada como "quase estável". Apenas 12.86% dos deslizamentos ocorreram na classe "instável" que associada às classes "limite superior" e "inferior" de instabilidade classifica 32,7% da instabilidade.

Nas classes de suscetibilidade do SHALSTAB, a classe " $\log Q/T < -3,1$ " é a classe que apresenta maior área na bacia, nomeadamente de 24.02%, seguindo-se a classe "cronicamente instável" com 16.98% e de 16.77% a classe "cronicamente estável". As restantes classes apresentam uma área residual.

Por outro lado, em termos de área deslizada por classe, 37% dos deslizamentos ocorreram na classe do "cronicamente instável" e 26% na classe seguinte ($\log Q/T < -3.1$), tendo as restantes classes valores bastante inferiores. O que denota uma correta classificação consoante os deslizamentos ocorridos.

Para validar os cenários realizados, utilizou-se a matriz de contingência (Fawcett, 2006) recorrendo ao inventário realizado tendo sido contabilizados 156 movimentos de vertente (Quadro 2).

Quadro 2- Validação.

Modelação		TPR	FPR	Acc	PPV	TPR/FPR
SHALSTAB	$c' - 2900 \text{ N/m}^2$; $Z - 2\text{m}$; $p_s - 16,7 \text{ kN/m}^3$; $\phi - 32^\circ$	0,77	0,67	0,33	0,00298	1,14
SINMAP	T/R min e máx-218,6 e 291,5 m ² /h; c' min e máx-2900 e 3877 N/m ² ; ϕ min e máx- 31,6 e 31,9°	0,51	0,38	0,62	0,00345	1,34

Assim relativamente à taxa TPR (*taxa de verdadeiros positivos*) é o cenário do SHALSTAB que obtém melhor classificação, com 77% dos deslizamentos corretamente classificados ao passo que o SINMAP só classificou 51% dos deslizamentos.

De acordo com a metodologia, valores superiores a 75% na taxa de verdadeiros positivos reflete uma boa classificação (Guzzetti, 2005).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho pretende avaliar a capacidade preditiva de dois modelos matemáticos de base física (SHALSTAB e o SINMAP) na modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente em áreas de patamares agrícolas com taludes em terra e muros de pedra em seco. O SHALSTAB utiliza no modelo hidrológico as áreas contributivas do MD8 que simula o processo de escoamento segundo caminhos preferenciais e maior concentração da drenagem interna. O SINMAP utiliza o D ∞ que modela as áreas contributivas com recurso a escoamento predominantemente difuso.

A modelação da suscetibilidade feita pelo SINMAP reflete a organização da vertente em patamares o que implica uma maior importância dos processos de infiltração propiciada pelas plataformas dos patamares agrícolas. No SHALSTAB a modelação reflete o contributo do fluxo interno da água mais dependente da disposição geral da vertente e muito pouco dependente da organização da vertente em patamares agrícolas. Apesar da construção de patamares sugerir uma maior capacidade de infiltração e escoamento difuso, é o SHALSTAB, com a definição de caminhos preferenciais, que nos oferece melhores resultados. A premissa de que a intervenção antrópica, favorecendo a infiltração ao longo de toda a vertente, influencia a modelação com base na difusão do fluxo interno, não é confirmada pelo que a validação positiva do SHALSTAB fortalece a ideia de maior importância dos caminhos preferenciais no escoamento no processo de modelação da instabilidade da vertente. A validação confirma que o SHALSTAB apresenta uma maior percentagem de deslizamentos bem classificados o que (77%), o que não se verifica no SINMAP.

Referências

Baum, R L; Savage, W Z; Godt, J W (2002). TRIGRS: A FORTRAN Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis.

- Borga, M; Dalla Fontana, G; Da Ros, D; Marchi, L (1998). Shallow landslide hazard assessment using a physically based model and digital elevation data. *Environmental Geology*. ISSN 0943-0105. Vol. 35, n.º 2-3 , p.81-88.
- Dietrich, William E; Reiss, R; Hsu, M; Montgomery, D R (1995) A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes*. ISSN 1099-1085. Vol. 9, n.º 3-4 , p.383-400.
- Fawcett, T (2006) An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. ISSN 0167-8655. Vol. 27, n.º 8 , p.861-874.
- Guzzetti, F (2005) Landslide Hazard and Risk Assessment, Bona.
- Montgomery, David R; Dietrich, William E (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*. ISSN 1944-7973. Vol. 30, n.º 4 , p.1153-1171.
- Quinn, P; Beven, K; Chevallier, P; Planchon, O (1991) The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models. *Hydrological Processes*. ISSN 0885-6087. Vol. 5, n.º 1 , p.59-79.
- Sousa, M Bernardo de (1989) Carta Geológica de Portugal: Notícia Explicativa da Folha 10- D, Alijó. Lisboa.
- Tarboton, D G (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. ISSN 0043-1397. Vol. 33, n.º 2 , p.309-319.
- WRB (2006) World reference base for soil resources: A framework for international classification, correlation and communication. Vol. 103 .